

論文 段落し部を2方向アラミド繊維シートで補強したRC橋脚の正負交番 載荷実験

浅井 洋^{*1}・三上 浩^{*2}・三加 崇^{*3}・井之上 賢一^{*4}

要旨:既設RC橋脚の段落し部をAFRPシートで曲げ補強する場合,柱軸方向の補強に加え,シートをピーリングに対して柱軸直角方向に閉合するシートを1層設置している。このような部位への2方向アラミド繊維シートの適用は,柱軸方向と柱軸直角方向を1層のシートで同時に補強することができ,施工の省力化が期待できる。本稿では,段落しを設けたRC橋脚模型試験体を1方向シートと2方向シートで補強し,正負交番載荷実験を行ってその性能を比較した。その結果,2方向シートは,1方向シートを軸方向と軸直角方向に補強した場合と同等の補強効果が得られることが示された。

キーワード:段落し,2方向アラミド繊維シート,AFRPシート,曲げ補強

1. はじめに

兵庫県南部地震等による橋梁の被災実態を踏まえ,橋梁の耐震補強が進められている。近年,連続繊維シートを用いた補修・補強に関する指針¹⁾や設計・施工要領(案)²⁾が整備され,鉄道橋や道路橋の橋脚等,既存RC構造物を対象とした耐震補強工事が実施されている。段落しを有するRC橋脚では,地震による損傷位置と破壊モードを限定するため,段落し部の曲げ補強が行われている。アラミド繊維FRPシートによる段落し位置の曲げ補強では,1方向にアラミド連続繊維を配置したFRPシート(以下,1方向シート)を補強耐力に応じて使用している。曲げ補強を目的に軸方向に設置したFRPシート(以下,曲げ補強シート)は,コンクリートのひび割れが進展すると,ピーリング等が生じやすいため,コンクリートとの一体性を強化することを目的として軸直角方向に閉合するシート(以下,拘束シート)を配置して,これに対処することがアラミド繊維シートの設計・施工要領(案)²⁾に規定されている。すなわち,曲げ補強では,曲げ補

強シートと最上層の拘束シートによって補強される。このような部位では,2方向アラミド繊維FRPシート(以下,2方向シート)を用いることが有効であると考えられる。2方向シートは,アラミド繊維を縦横に織ったものであり,これを貼り付けることで,軸方向と軸直角方向の補強が同時に行えるシートである。しかしながら,繊維を2方向に織ると,引張力が作用した際に繊維にせん断力も作用するため,繊維の強度や伸びを十分発揮しないで破断して,所定の補強効果が得られないことが懸念される。そこで,段落しを有するRC橋脚の模型試験体を製作し,1方向シートと2方向シートそれぞれで曲げ補強を行い,補強効果を比較した。また,段落し部の曲げ補強シートの定着長は,設計・施工要領(案)が整備された当初,十分な知見が得られていない等の理由で,必ずしも経済的な設計法が用いられているとは言えない。最近,段落しの定着長に関する新たな知見^{3~5)}が得られており,本稿ではこの結果に基づいた定着長を採用し,実験的検討を行った。

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*4 ファイベックス(株) 土木部部长 (正会員)

2. 実験方法

2.1 試験体形状

試験体の形状を図-1に示す。柱断面は250mm×250mmの矩形であり、柱隅角部は半径10mmの面取りを行った。主鉄筋は、柱基部でD16 (SD345) を16本配置し、フーチングに十分な定着長をとって定着した。柱基部から650mmの位置に段落しを設け、四隅の4本の鉄筋のみ柱上部まで配置した。帯鉄筋は、柱基部から上部までD10(SD295)を100mm間隔で配置した。試験体の一覧を表-1に示す。試験体は、アラミド繊維シートの種類と貼り付け方法を変えた4試験体と無補強試験体の計5試験体である。試験時のコンクリート強度は、A4が32.4N/mm²であり、他の試験体が39.1N/mm²である。

2.2 アラミド繊維シート

本実験で用いたアラミド繊維の引張強度は、2060N/mm²であり、弾性係数は118kN/mm²である。アラミド繊維シートは、1方向シートと2方向シートの2種類を使用した。1方向シートの引張耐力は、1方向あたり600kN/mである。2方向シートは、1方向シートと同じ繊維量を縦横に織ったもので、製品化されている最大耐力のシートである。補強試験体の曲げ補強量は、全ての試験体でシート1層(600kN/m)とした。A1は、曲げ補強シートに幅250mmの1方向シートを軸方向に1層4面に貼り付けたものであり、

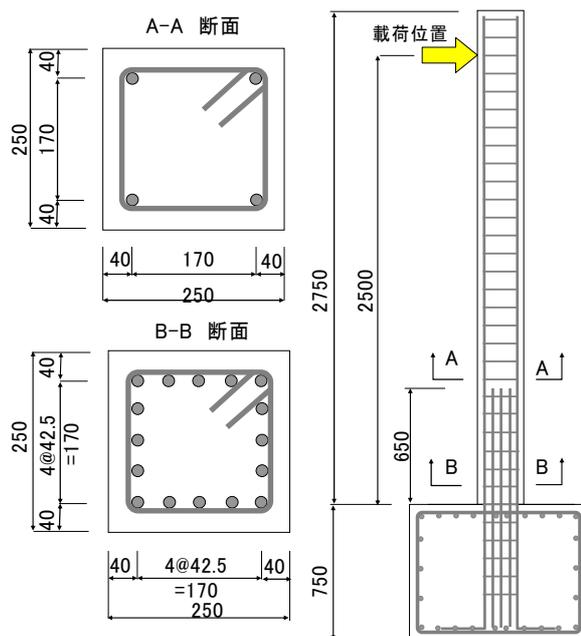


図-1 試験体形状

拘束シートによる補強は行っていない。A2は、A1と同様に曲げ補強シートを1層貼り付け、さらに拘束シートを1層巻き付けたものである。拘束シートは軸方向にラップを設けていない。A3試験体は、幅250mmの2方向シートを4面に貼り付け、軸直角方向に繊維が閉合するように、柱隅角部4箇所にも軸直角方向に繊維を配置したシートを貼り付けた。A4は、2方向シートを軸直角方向に閉合し、鉛直方向には200mmのラップ長を設けたものである。

表-1 試験体一覧

試験体記号	N	A1	A2	A3	A4
補強シート	なし	アラミド繊維 1方向シート	アラミド繊維 1方向シート	アラミド繊維 2方向シート	アラミド繊維 2方向シート
補強方法	なし	曲げ補強シート 1層	曲げ補強シート 1層 拘束シート 1層	1層	1層
シート容量(kN) 曲げ補強/拘束	なし	600	600/600	600/600	600/600
概略図					

2.3 補強範囲

設計・施工要領(案)²⁾によるアラミド繊維シート
の段落し部曲げ補強は、柱基部に生じる曲げ
モーメントが初期降伏曲げモーメントの 1.2 倍
となる水平荷重が上部工載荷位置に作用する
とき、段落し照査位置の曲げモーメントと主鉄筋
初期降伏曲げモーメントとの差を不足モーメン
トとし、これに対して曲げ補強を行っている。
本実験では、段落し部のアラミド繊維シートに
よる曲げ補強効果を確認することを目的とし
ているため、補強後においても段落し部で曲げ破
壊するように計画した。断面性能を表-2に示す。

アラミド繊維シートの貼り付け範囲を図-2
に示す。主鉄筋降伏領域は、補強後の段落し位
置に曲げ破壊モーメントが作用するときに、主
鉄筋が降伏する領域である。このとき、段落し
した鉄筋は、段落し位置まで有効として鉄筋の
定着長は考慮していない。アラミド繊維シート
は、主鉄筋降伏領域から上下にシート定着長を
確保した範囲（柱基部からの高さ 400mm～
1682mm, 1282mm 区間）に貼り付けた。この
ときのシート定着長は、上側定着長を 0.5D とし、
下側定着長を 1.0D とした^{3),5)}。ここに、D は柱
断面高さ (=250mm) である。

2.4 載荷方法

試験体柱基部から 2.5m の位置に油圧ジャッキ
で水平荷重を与えた。荷重は、段落し位置の主
鉄筋引張ひずみが初期降伏ひずみ(0.198%)に達
した時の水平変位を $1\delta_{y0}$ とした。その後、水平
変位を $1\delta_{y0}$ の整数倍で増加し、各 δ_{y0} あたり 3
回の正負交番載荷を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重と変位の関係

試験結果の一覧を表-3に示し、載荷位置の水平
変位と載荷荷重との関係を図-3に示し、破壊
状況を写真-1に示す。補強試験体は、N より最
大荷重が増加しており、補強効果が得られてい
る。A1 は、正載荷側 $2\delta_{y0}$ の 2 回目（以下、+2
 δ_{y0} -2）に、すでに N と同程度まで低下し、補強

表-2 試験体断面性能

位置	補強の有無	初期降伏 モーメント (kN・m)	抵抗 モーメント (kN・m)	初期降伏 荷重 (kN)	曲げ破壊 荷重 (kN)
段落し位置	補強前	25.4	27.5	13.7	14.9
	補強後	31.5	61.8	17.0	33.4
柱基部	-	73.5	92.2	29.4	36.9

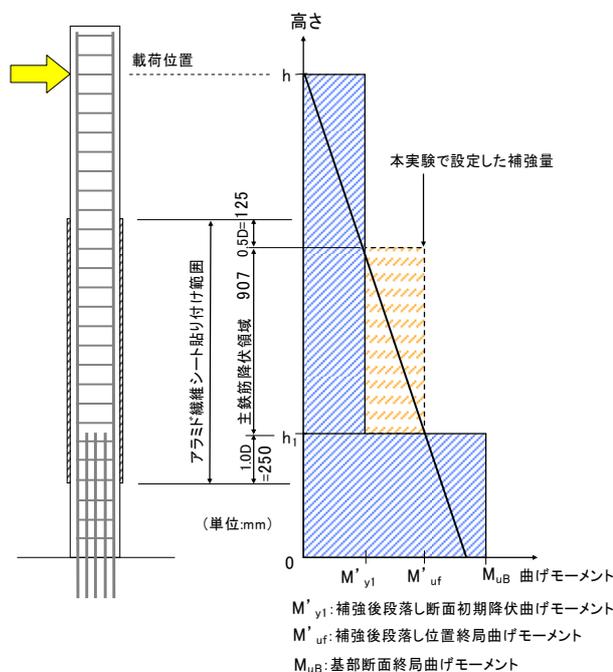


図-2 実験の補強範囲

表-3 試験結果一覧

試験体 記号	主鉄筋初期降伏		最大荷重(kN)		破壊位置	破壊形態
	荷重(kN)	変位(mm)	正側	負側		
N	13.4	24.9	17.1	-18.0	段落し部	曲げ
A1	21.2	35.3	27.8	-25.4	段落し部	曲げ
A2	22.1	36.9	30.9	-29.2	段落し部	曲げ
A3	20.4	32.1	30.9	-31.0	段落し部	曲げ
A4	23.0	33.8	30.8	-28.9	段落し部	曲げ

効果が失われた。A2～A4 の最大荷重に顕著な差
は認められず、その後の荷重低下についてもほ
ぼ同様の挙動を示した。しかし、表-2に示す段
落し位置の曲げ破壊荷重の 83～92%と小さく、
想定した補強耐力が得られていない。これは、
シートがコンクリートから剥離し、一体として
挙動しなかったためである。既往の研究³⁾では、
交番載荷面の 2 面を 1 方向シートで曲げ補強し
て定着長の検討を行っているのに対し、本研究
では 4 面を補強している点が異なる。すなわち、
4 面を補強した場合、側面のシートも柱の曲げ補

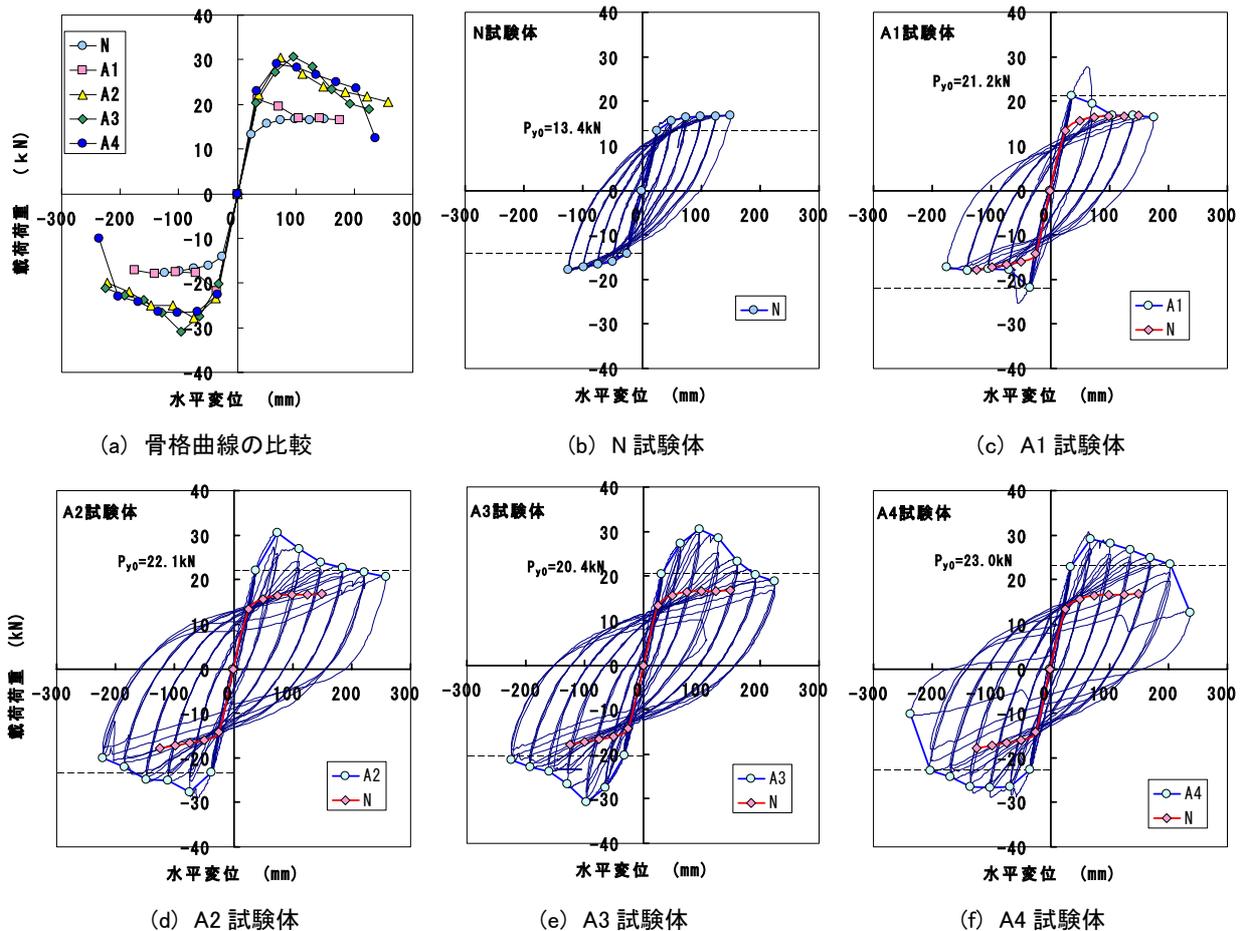


図-3 載荷荷重と水平変位の関係

強に寄与するため、特に隅角部のコンクリートに作用する力が増加し、定着長が不足したことが原因の一つに考えられる。

Nは、 $+4\delta_{y0-1}$ で最大荷重を示し、ほぼ同じ荷重を $+6\delta_{y0}$ まで維持した。試験装置の関係上、Nに限り $6\delta_{y0-1}$ で載荷を終了した。軸方向のみに1方向シートで曲げ補強したA1は、 $+2\delta_{y0-1}$ 直前で、シートがかぶりコンクリートとともに剥離した。剥離とともに、柱側面のシートに亀裂が生じ、耐力は著しく低下してNと同じ骨格曲線を示した。このことから、曲げ補強シートだけによる補強では、シートの剥離とともに補強効果が完全に失われることが示された。

曲げ補強シートと拘束シートで補強したA2は、 $+2\delta_{y0-1}$ で最大荷重を示した後、 $+2\delta_{y0-2}$ の載荷で段落し位置より下側150mm程度の位置に、円形状の剥離が観察された。しかし、剥離が生じた後も荷重はNの値より大きく、シートの補

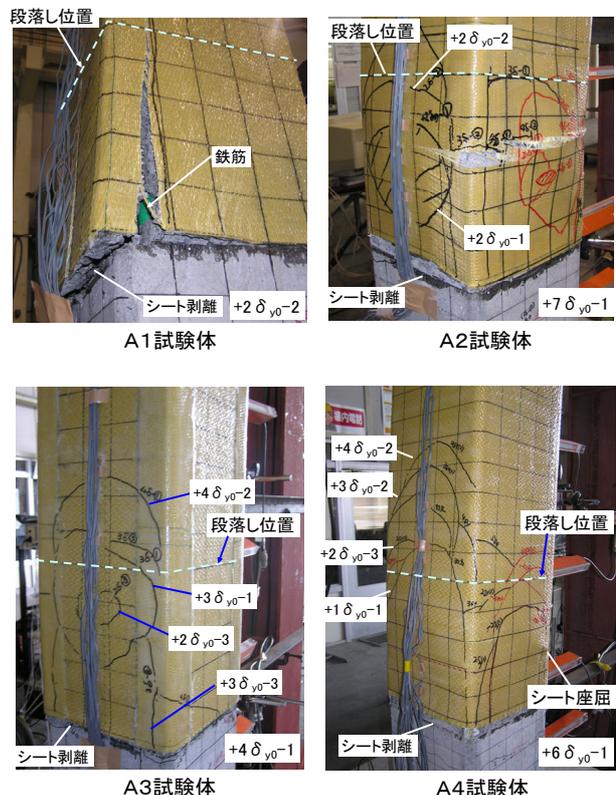


写真-1 シート破壊状況

強効果は完全に失われたわけではないと考えられる。すなわち、A1で生じたような、かぶりコンクリートの破壊と主鉄筋のはらみだしが曲げ補強シートを外側に押し出し、ピーリングやかぶりコンクリートの剥離を拘束シートが抑制した効果によるものと考えられる。柱隅角部でシートの剥離は観察されず、拘束シートが機能していることが確認できる。

2方向シートを用いたA3は、 $+2\delta_{y0-3}$ で段落し位置より下側50mm程度に小さな剥離が発生したが、荷重の低下は認められず、 $+3\delta_{y0-1}$ で最大荷重を示した。 $+3\delta_{y0-2}$ では、シート下端まで剥離が達すると耐力が徐々に低下した。

A4では、 $+2\delta_{y0-1}$ で段落し位置の上側50mmからシート下端に至る剥離が生じた。その後、正負交番を繰り返すと、剥離は上方に進展した。写真に認められるように、剥離が生じたシートに圧縮力が作用すると、シートの座屈が生じる。座屈が生じたシートは、再び引張力を受けると破断しやすく、柱隅角部に水平方向の亀裂が生じる。履歴曲線に見られるように、拘束シートの効果が期待できれば、約 $6\delta_{y0}$ まで主鉄筋の初期降伏荷重を維持することが確認できる。

以上の結果から、2方向シート1層による補強は、曲げ補強シートと拘束シートで補強した場合と同等の補強効果が得られると言える。A3とA4の耐力に差が認められないことから、ラップ長を確保すれば2方向シートの貼付け方向によ

る差はないことが示された。また、拘束シートは、載荷面のかぶりコンクリートのはらみだしやシートのピーリング、側面の曲げ補強シートの鉛直亀裂を補強し、最大荷重以降の荷重低下の抑制に有効であることが確認された。

3.2 軸方向ひずみ分布

図-4に最大荷重時の柱軸方向ひずみ分布を示す。鉄筋ひずみは、柱隅角部に位置する段落ししていない鉄筋の値であり、シートひずみは載荷面の柱軸心位置の値である。計算値は、断面分割法によって算出した値である。主鉄筋のひずみは、段落し位置で初期降伏ひずみに達すると、荷重の増加に伴ってひずみが増加した。シートを柱全面に接着したため、コンクリートのひび割れ状態は観察できないが、計算値に比べて鉄筋ひずみが非常に大きいことから、この付近に曲げひび割れが発生していると推察される。柱基部のひずみは計算値とよく一致している。柱基部から段落し位置にかけての値は増加する傾向にあり、段落し鉄筋の定着区間と考えられる。

シートひずみは鉄筋ひずみ同様、段落し位置付近で大きく、ほぼ計算値に近い値を示し、段落し位置からシート下端にかけてひずみは減少している。A3を除き、シートの剥離が生じる直前の状態である。A3では、概ね鉄筋ひずみとシートのひずみは同様な形状を示しているのに対して、他の試験体は段落し部を中心に局部的に

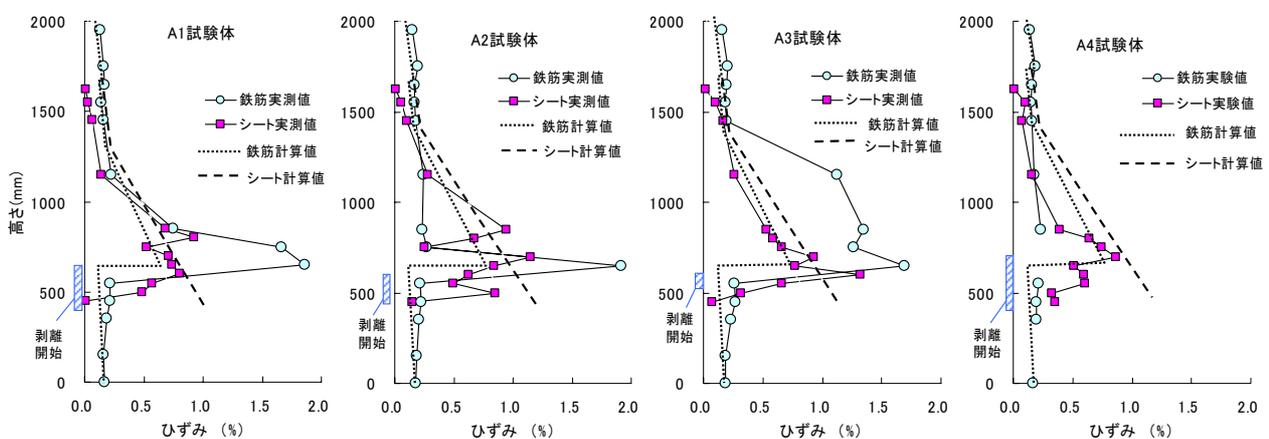


図-4 最大荷重時における鉄筋およびシートのひずみ分布

剥離が始まり、シートひずみの平均化が認められる。各試験体の剥離開始位置を図中に示した。剥離が生じた位置の鉄筋やシートのひずみは大きく、段落し付近のシートひずみの計算値が1.0%程度になると剥離が発生している。また、A4のシート最下端のひずみゲージには、0.35%のひずみが生じており、剥離が進んでいるものと思われる。

図-5にA3の主鉄筋のひずみ履歴のうち、鉄筋のはらみ出しが生じた領域を抽出して示す。段落し位置 ($h=650\text{mm}$) の主鉄筋ひずみ履歴では、 $+1\delta_{y0-3}$ で主鉄筋は降伏しているが、座屈が生じた挙動は認められない。 $+2\delta_{y0-1}$ の荷重後、矢印で示す負の荷重が作用する領域で、はらみ出そうとする挙動が認められる。他の柱高さの位置でも同様に、荷重の増加がほとんど無く、ひずみが大きく増加した後、負の荷重に至るとはらみ出す挙動が認められる。このように、段落し位置から上下に順次はらみ出す挙動を示している。これを、写真-1に示したA3のシートの剥離と比較すると、剥離が生じた後にはらみ出しの現象が認められる。すなわち、鉄筋を拘束していたシートは、鉄筋のはらみ出し力に押されて剥離が生じ、拘束力が低下することで鉄筋にはらみ出しの変形が生じるものと考えられる。したがって、シートの剥離は、鉄筋のはらみ出しに起因していると推察される。

4. 結論

2方向アラミド繊維FRPシートの性能とシートの剥離について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 拘束シートは、軸方向シートのピーリングとかぶりコンクリートの剥離を拘束し、柱耐力の著しい低下を抑制する。
- (2) 2方向シートは、1方向シートを軸方向と軸直角方向に貼り付ける効果と同等である。
- (3) 2方向シートの曲げ補強効果は、ラップ長を確保すれば貼付け方向の影響を受けない。
- (4) シートの剥離は、シートひずみの大きい位置から発生し、上下に進展する。

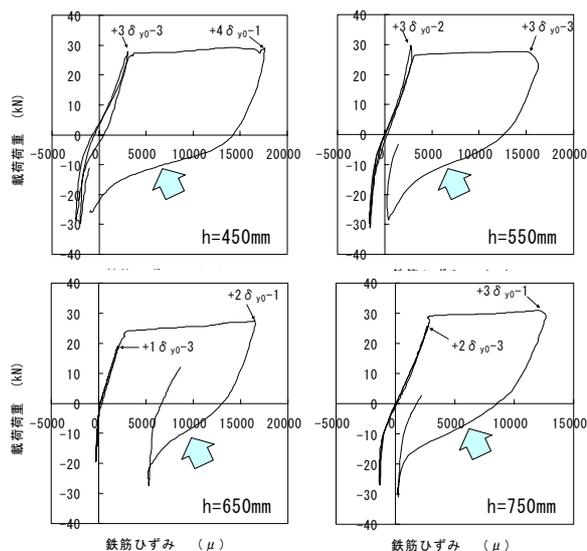


図-5 A3の鉄筋ひずみ履歴

- (5) シートに剥離が生じるときのひずみは約1.0%である。
- (6) シートの剥離は鉄筋の座屈に伴うはらみ出しに起因する。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー第101号，2000.7
- 2) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案），1998.1
- 3) 岸 徳光，三上 浩，栗橋 祐介，澤田 純之：AFRPシートを用いたRC橋脚段落し部の曲げ補強法に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.50A，pp.749-759，2004.3
- 4) 栗橋祐介，岸徳光，三上浩，松岡健一：FRPシートの必要接着長に着目した曲げ補強RC梁の静荷重実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，2001
- 5) 岸徳光，三上浩，澤田純之，竹田俊明：段落し部をAFRPシートで補強したRC橋脚模型のシートの上縁接着長に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1441-1446，2002